

纳米技术在肉类保鲜中的应用研究进展

邓钰桢^{1,2}, 张亚迪^{1,2}, 杨晓溪^{1,2}, 边朋沙³, 郎玉苗^{1,2,*}

(1.河北大学公共卫生学院, 河北 保定 071002; 2.河北省公共卫生安全重点实验室, 河北 保定 071000;

3.河北省地质实验测试中心, 河北 保定 071000)

摘要: 肉品保鲜技术能够延缓肉品氧化反应及其腐败变质, 提高肉品品质和安全性。常用的保鲜方法可分为物理保鲜方法和化学保鲜方法, 其中物理保鲜技术是一种有效抑制细菌或杀死细菌的保鲜方法, 然而其成本高、操作复杂、难以把控; 化学保鲜方法成本低、保鲜效果好, 但存在潜在毒性等问题。纳米材料因其特殊结构引起表面效应、小尺寸效应、量子尺寸效应和宏观量子隧道效应的特性可减少保鲜剂的使用, 并提高保鲜剂的作用效果。纳米技术在肉类保鲜中已有应用并呈现良好保鲜效果, 因此利用纳米技术有望开发出低成本、高效、安全的保鲜方法。本文对肉品保鲜中常用纳米技术进行介绍, 综述纳米技术在肉类保鲜中的应用, 并对纳米技术在肉类保鲜中的应用进行展望。

关键词: 纳米技术; 肉类; 抑菌; 抗氧化; 品质特性

Application of Nanotechnology in Meat Preservation: A Review

DENG Yuzhen^{1,2}, ZHANG Yadi^{1,2}, YANG Xiaoxi^{1,2}, BIAN Pengsha³, LANG Yumiao^{1,2,*}

(1.College of Public Health, Hebei University, Baoding 071002, China; 2.Key Laboratory of Public Health Safety of Hebei Province, Baoding 071000, China; 3.Hebei Research Center for Geoanalysis, Baoding 071000, China)

Abstract: Meat preservation technology can delay meat oxidation and spoilage and consequently ensure meat quality and safety. Physical and chemical methods are nowadays commonly used for meat preservation. Physical preservation technology can effectively inhibit or kill bacteria, despite being costly, complicated to operate, and difficult to control. Chemical preservation method is cheap and efficient, but its application is hampered by problems such as potential toxicity. Nanomaterials can reduce the dose and improve the efficiency of preservatives due to the surface effects, small size effects, quantum size effects, and macroscopic quantum tunneling effects caused by the special structures of nanomaterials. At present, nanotechnology has been applied in meat preservation with good efficiency. Therefore, it is expected that nanotechnology will be used to develop low-cost, efficient and safe preservation methods. This article summarizes the nanomaterials commonly used in meat preservation, and discusses the current and future applications of nanotechnology in meat preservation.

Keywords: nanotechnology; meat; bacteriostatic; antioxidant; quality characteristics

DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-276

中图分类号: TS251.1

文献标志码: A

文章编号: 1001-8123 (2020) 12-0087-07

引文格式:

邓钰桢, 张亚迪, 杨晓溪, 等. 纳米技术在肉类保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(12): 87-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-276. <http://www.rlyj.net.cn>

DENG Yuzhen, ZHANG Yadi, YANG Xiaoxi, et al. Application of nanotechnology in meat preservation: a review[J]. Meat Research, 2020, 34(12): 87-93. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20201123-276. <http://www.rlyj.net.cn>

收稿日期: 2020-11-23

基金项目: 国家自然科学基金青年科学基金项目 (31701531); 河北省自然科学基金项目 (C2018201146);

“一省一校”工程项目 (801260201078); 河北大学研究生创新资助项目 (HBU2021ss008);

河北大学大学生创新创业项目 (2019273; 2020388)

第一作者简介: 邓钰桢 (1996—) (ORCID: 0000-0002-6329-3889), 女, 硕士研究生, 研究方向为营养与食品卫生学。

E-mail: ddyz126@126.com

*通信作者简介: 郎玉苗 (1984—) (ORCID: 0000-0002-2302-0827), 女, 副教授, 博士, 研究方向为农产品质量与食品安全。

E-mail: ymlang@126.com

随着经济的发展以及人们生活水平的提高,肉类销售量呈逐年上升趋势,2019年肉类产量已达到7 649 万t^[1]。肉品营养丰富,在屠宰、分割、运输和销售过程中易发生腐败变质及一系列生化反应,如脂肪氧化、肉色褪色等,进而使肉品安全性及品质下降。因此,肉类保鲜技术的研发对保障肉品质量与安全至关重要^[2-3],有助于肉品产业健康、可持续发展,保障消费者生命健康。食品保鲜方法主要为物理保鲜方法和化学保鲜方法^[4]。物理保鲜技术有冷藏、冻藏、真空包装、气调包装、活性包装、平衡改性气调包装、高压、辐射和脉冲电场等,但其存在成本高、难控制、肉类品质降低等问题。在肉制品保鲜中化学保鲜技术主要分为应用化学防腐剂和天然防腐剂,化学防腐剂成本低、用量少,然而却存在一定毒性;天然防腐剂具有良好的抑菌性和抗氧化性,但存在稳定性和溶解性差等问题^[5-7]。因此,寻找一种便捷、高效、安全的肉类保鲜方法对肉类发展至关重要。

纳米保鲜技术是指利用纳米材料作为保鲜剂或将纳米材料添加到食品包装中起到对食品的抑菌保鲜作用^[8]。通过控制纳米粒子尺寸、粒子间相互作用等方式,可以促进纳米材料在食品中的应用^[9]。纳米技术有助于增强防腐剂特性、延长食品货架期、改善肉类质地、满足味蕾、改善封装食品气味、营养物质稳定性和生物利用度^[10-11]。Sullivan等^[12]发现,苯甲酸和山梨酸的纳米级增溶剂与苯甲酸和山梨酸的非纳米等效物相比,抗菌性能更佳。由于纳米级抑菌剂具有尺寸小、表面积大等特点,不仅对细菌表现出高抑菌性,而且对生物膜有较强的抵抗作用。Yao Xiaolin等^[13]用乳化-凝胶技术制备了一种可以抑制富马酸亚铁释放出铁味的微结构凝胶珠,从凝胶珠释放的亚铁离子在模拟胃液中被阻滞,然后在模拟肠液中进行更程度的释放,有利于十二指肠对铁的吸收。Alizadeh-Sani等^[14]使用浇铸法制备由纤维素纳米纤维/乳清蛋白作为基质,二氧化钛颗粒和迷迭香精油作为功能成分的生物聚合物包装材料,该活性包装材料显著抑制了羔羊肉贮藏过程中的微生物生长、脂质氧化和脂肪降解作用,从而使保质期从约6 d增加到15 d。

目前许多研究者将纳米技术应用到肉类保鲜中,其中在纳米包装上应用最多^[15]。利用纳米粒子特性,可有效提高肉品质量、安全性和功能性。本文将围绕纳米保鲜技术在肉类中的应用现状进行总结和分析,从不同方面的应用进行阐述,为纳米保鲜技术在肉类中的应用提供依据。

1 肉品保鲜中常用的纳米技术

纳米技术是用单个原子、分子制造物质的科学技术,所用材料尺寸1~100 nm。纳米材料具有尺寸小、

表面能高、比表面积大等特点,物质特性会随粒子尺寸减小发生显著变化^[16]。纳米保鲜技术是将具有保鲜效果的天然提取物质以纳米形式添加到肉类加工过程中或添加到聚合物的纳米复合包装材料中,有利于促进保鲜效果。肉品保鲜中常见的纳米材料形式为纳米乳液、纳米纤维、纳米胶囊、纳米涂层和纳米级成分/添加剂等,纳米材料的应用有利于改善肉类风味和口感、延长货架期等^[17]。纳米乳液广泛应用于提高疏水性成分的生物利用度,通常通过高压均化器、高速均化器、超声发生器或微流化器与乳化剂作用或改变溶液相的条件等结合制备^[18-19]。纳米纤维更多应用于肉制品包装材料,如静电纺丝法制备的纳米纤维可以防水、防油、防污,更好地控制透气率,避免肉制品受到外界环境的污染。纳米胶囊在肉制品保鲜中的应用有利于包埋本体颜色、气味,避免影响肉制品感官;增大溶解性,提高抑菌效果;起到缓释作用,延长作用时间。纳米颗粒可以提供高负载能力和稳定性、持续释放以及跨细胞膜和生物屏障携带亲水性和亲脂性物质的能力^[20-21],有利于保鲜剂作用于肉类时发挥更优作用。

1.1 纳米材料的制备

食品工业中常用纳米制备技术有离子凝胶法、沉淀法、自组装法和静电纺丝技术等其他方法^[22-23]。离子凝胶法是指利用阳离子与阴离子通过静电吸引作用产生交联形成纳米粒子。Martínez-Hernández等^[24]采用水包油乳液在壳聚糖溶液中形成香芹酚液滴,每个液滴通过质子化氨基离子(NH_3^+)交联,壳聚糖分子与聚磷酸基团结合,形成壳聚糖纳米粒子。沉淀法是指在样品与载体材料混合溶液中,通过物理化学因素影响载体材料的溶解度,从而使纳米微粒析出。Seetha等^[25]采用沉淀法合成可见光的氧化铟纳米粒子,以乙醇溶解的氢氧化钠为沉淀剂,得到氢氧化铟沉淀。自组装法是利用分子的自组装能力,通过非共价作用自发形成具有特定排列顺序的分子聚合物。Xiang Siying等^[26]通过“绿色”化学合成策略,以绿茶提取物为基础制备纳米粒子,发现纳米粒子的形成过程包括共价共聚合和非共价超分子自组装途径,使纳米粒子的粒径和化学成分得以微调。静电纺丝技术是指通过静电力制备聚合物纳米纤维的方法,主要是利用高压静电激发聚合物的带电射流,使射流固化得到纳米纤维。Lin Lin等^[27]采用静电纺丝技术将辣木油/壳聚糖纳米颗粒应用于食品包装中,其中水蒸气透过率是纳米纤维的主要参数,与食物和环境间的水分转移有关,表面低水蒸气透过率的材料适合包装食品并能延长食品保质期。

1.2 纳米材料来源

纳米复合材料的聚合物可以分为天然和合成2种来源。合成聚合物大多以石油为基材,可以分为化学合成



(聚己内酯、聚乳酸、聚乙醇酸)和微生物分泌物(多羟基链烷酸酯、聚-*b*-羟基丁酸酯)两大类,但合成聚合物存在污染环境、回收率低、对人体具有潜在危害等缺点^[28]。天然聚合物主要分为脂质(如小烛树蜡、巴西棕榈蜡和蜂蜡等)、蛋白质(如明胶、乳清蛋白、大豆蛋白、胶原蛋白等)和多糖(如壳聚糖、海藻酸钠、果胶、阿拉伯胶及其各种衍生物等)三大类。各种天然聚合物逐渐取代单一或合成聚合物。基于天然聚合物制备的纳米复合材料具有良好的机械性能、生物相容性、生物降解性、耐化学性、抗菌性和阻气性^[29-31],且具有成本低、易加工、可降解等优点^[32-33],可以用作食品包装的生态友好型材料。Wu Zhengguo等^[34]采用脂质体包封月桂精油和银纳米粒子,并与壳聚糖混合包埋聚乙烯(polyethylene, PE)膜包装猪肉,结果表明,薄膜具有良好的抗菌活性,可使猪肉在4℃保存15 d,而纯PE膜包装仅保存9 d。

2 纳米技术在肉品中的应用

2.1 抑菌方面的应用

肉类含有丰富的营养物质,极易发生腐败变质。肉类的腐败变质可分为生物、化学和物理三大类,其中生物因素导致的腐败变质最为常见。常见的肉制品腐败菌和致病菌有大肠杆菌、金黄色葡萄球菌、单核李斯特菌、乳酸菌、铜绿假单胞菌、荧光假单胞菌和枯草芽孢杆菌等^[35]。抑菌剂根据来源可分为合成抑菌剂和天然抑菌剂。常用的合成抑菌剂有苯甲酸钠、山梨酸钾、对羟基苯甲酸酯类、丙酸盐、亚硫酸及其盐类、硝酸盐及亚硝酸盐等,合成抑菌剂虽有良好的抑菌性,但对人体存在潜在危害。天然抑菌剂大部分来源于水果和蔬菜,常用的有生物碱类、有机酸类、黄酮类、单宁类物质等,具有良好的抑菌性,但存在不稳定、水溶性差、易受pH值影响等问题^[36-37]。将抑菌剂通过纳米技术修饰,可以增强其抑菌活性、减少抑菌剂使用、掩盖抑菌物质本身颜色,有助于保持食品原有品质、增大溶解性和抑菌作用的发挥等^[38-40],提高抑菌剂在肉类应用上的效果。纳米抑菌材料能够破坏细胞膜,并阻碍电子及质子的传递,使细胞内容物凝固^[41];与细胞膜内磷脂相互作用,引起细胞内容物外流^[35];降低原料肉的pH值,抑制微生物的生长^[42];其代谢过程中产生的酸、过氧化氢、二氧化碳和细菌素能够抑制腐败菌生长^[43]。Cui Haiying等^[44]将茶树精油脂质体/壳聚糖纳米纤维膜应用于鸡肉样品,并测定其抑菌性,结果表明,在4、12、25、37℃对鼠伤寒沙门氏菌有良好的抑菌性,并且可以在贮藏4 d内有效保持鸡肉的质量。纳米技术在肉制品抑菌方面的应用见表1。

表1 纳米技术在抑制肉类微生物中的应用
Table 1 Current applications of nanotechnology to inhibit microorganisms in meat and meat products

肉样	纳米结构材料	效果	参考文献
新鲜猪肉	罗非鱼皮明胶和含姜精油的ZnO纳米颗粒的微乳液纳米膜	表现出较强的抑菌性,尤其是对革兰氏阳性菌	[45]
萨拉米香肠	含萜烯、类萜和松节油的β-萜烯缩合聚合物的纳米材料	萨拉米香肠保存期限50 d	[46]
猪肉饼	丁香精油纳米胶囊	显著抑制猪肉饼脂质氧化和微生物生长,且对猪肉饼冷藏期间的感官指标没有不良影响	[47]
鸡蛋	纳米Ag@SiO ₂ 改性聚偏二氯乙烯涂膜材料	可延长清洁鸡蛋保质期至7周	[48]
冷鲜猪肉	丁香酚纳米微粒	有效抑制肉品中致病菌生长并延缓其pH值上升	[49]
鲜牛肉	含ZnO纳米颗粒和TiO ₂ -ZnO纳米颗粒的低密度PE薄膜	延长新鲜小牛肉保质期,并对金黄色葡萄球菌起到良好抑制作用	[50]
羔羊肉	二氧化钛和迷迭香精油的乳清蛋白分离物/纤维素纳米复合膜	纳米复合膜的使用显著减少了细菌计数,对革兰氏阳性菌的抑制作用大于革兰氏阴性菌	[51]
生肉	壳聚糖-ZnO纳米复合材料袋	具有显著抗菌活性,在4℃贮存6 d,完全抑制了微生物的生长	[52]
鲜肉鸡	负载姜黄素的纳米乳液	与常见塑料袋包装相比,食品级的薄膜增强抑菌性,将新鲜肉鸡保质期从11 d延长至17 d	[53]
猪肉	肉桂精油微乳、正十四烷微胶囊	贮藏9 d后,肉桂精油微乳与正十四烷微胶囊的组合不会导致猪肉丸的颜色参数发生变化,阻碍菌落总数、乳酸菌、肠杆菌科和葡萄球菌数的增长,可以延长猪肉保质期	[54]
火鸡	掺入纤维素纳米晶体和葡萄渣提取物制备淀粉活性纳米复合薄膜	将复合薄膜包裹在火鸡表面后,能抑制单核细胞增生李斯特菌的生长,具有更强的抗菌作用	[15]

2.2 抗氧化方面的应用

肉类中含有丰富的饱和脂肪酸和不饱和脂肪酸,其中不饱和脂肪酸中不稳定的双键氧化能够产生一些影响肉制品颜色、质构、气味和营养品质的次级氧化产物,如己醛、戊醛、庚醛、辛醛等^[55],从而导致肉制品褪色并产生异味^[56-57]。为了保证肉类品质、延长货架期,抗氧化剂在肉制品保鲜中必不可少,在生鲜肉保鲜中也具有很大的意义。抗氧化物质可分为合成抗氧化物质和天然抗氧化物质。合成抗氧化物质主要有丁基羟基茴香醚和二丁基羟基甲苯等,虽然抗氧化效果好,但其安全性一直受到质疑。天然抗氧化物质主要有黄酮类、苯酚类、皂苷类、鞣质类、生物碱类、多糖类、VA、VC、VE及其衍生物,虽然有好的抗氧化作用,但存在稳定性差、溶解性差等问题,影响其在肉类中的应用^[58-60]。相比于合成抗氧化物,大众更倾向于天然抗氧化物^[59]。抗氧化剂在肉类应用中主要有3种机制:氢原子转移、金属离子螯合及电子伴随质子转移^[58]。基于抗氧化剂的纳米材料依靠纳米粒子的尺寸效应更易清除或阻止自由基,能增大天然抗氧化剂的溶解度和稳定性,且具有缓释作用,延长抗氧化时间。Xiang Siying等^[26]以茶叶提取物为基础,通过共价共聚合和非共价超分子自组装制备一系列功能纳米粒子,通过1,1-二苯基-2-三硝基苯肼自由基清

除实验证实多酚纳米粒子具有良好的自由基清除能力。武陶^[61]利用离子凝胶法制备山梨酸纳米颗粒, 比较空白组、空白纳米粒子组、山梨酸纳米粒子组和山梨酸组中式香肠自然风干20 d后贮藏期间的过氧化值, 结果表明, 空白组过氧化值一直上升, 其他组大致为先上升后下降的趋势, 其中, 山梨酸纳米粒子组过氧化值最低。一些抗氧化物质与纳米技术相结合在肉类中的应用如表2所示。

表2 纳米技术在抑制肉类氧化反应中的应用

肉样	纳米结构材料	效果	参考文献
鸡胸肉	基于低密度PE包装中添加ZnO+Ag纳米颗粒的薄膜	薄膜可延缓鸡胸肉变质和脂质氧化, 显示出更低的耗氧量	[62]
新鲜猪肉	基于罗非鱼皮明胶和含姜精油的ZnO纳米颗粒的微乳液纳米膜	表现出较强的抗氧化性, 从而有利于延长保鲜期	[45]
猪肉饼	丁香精油纳米胶囊	不仅延长了抗菌抗氧化作用时间, 显著抑制了脂质氧化和微生物生长, 且对猪肉饼冷藏期间的感官指标没有不良影响	[47]
冷鲜猪肉	丁香酚纳米微粒	丁香酚具有抗氧化活性, 有效防止猪肉中肌球蛋白的交联变性, 抑制其持水力下降	[49]
冷却猪肉	山梨酸纳米微粒	经山梨酸纳米微粒涂膜处理的冷却猪肉, 货架期比空白微粒组延长5 d, 证明山梨酸纳米微粒具有抑制脂肪氧化、延长冷却猪肉货架期的作用	[63]
新鲜家禽碎肉	壳聚糖结合ZnO纳米粒子的生物纳米复合材料	增强了薄膜的抗氧化性, 延长肉类货架期	[64]
羔羊肉	纳米囊封植物精油的壳聚糖涂层	涂层处理可以有效抑制化学变质, 延长精油释放, 使抗氧化活性更持久, 并改善感官属性	[65]

2.3 保持品质特性方面的应用

食品需色香味俱全, 肉类的主要品质属性是外观、质地、多汁性、风味和功能性。在所有品质属性中, 外观是消费者选择食品的最关键条件, 而颜色一直是新鲜家禽和肉类产品及最终产品满意度的主要选择标准。影响肉色的主要因素是肌红蛋白含量、血红素结构的化学状态和肉的pH值^[66]。除此之外, 肉类的保水性对感官特性产生很大影响, 肉类水分分为游离水、束缚水和结合水, 当处于不同的保存环境时, 可能引起肉类水分含量减少、水分状态转化, 从而引起感官改变^[67]。在肉类的生产、加工、运输和销售中, 如何在保持原有色香味的同时延长货架期、改善口感、提高营养是目前的研究热点。肉类的品质不仅影响肉类的营养价值、质地等食用品质, 而且影响其经济价值。许多研究者通过包装材料与纳米技术相结合, 不仅延长了肉类货架期, 而且促进了人体对营养物质的消化吸收。Zhang Huiyun等^[68]制备封装龙蒿精油的纳米胶囊, 并与壳聚糖-明胶结合制成可食用涂膜, 对猪肉片进行涂膜处理可以有效延缓样品的颜色变化, 表明经过纳米技术处理的龙蒿精油可显著延缓猪肉片褐变、褪色。Amjadi等^[69]制备掺入甜菜碱纳米

脂质体的明胶/壳聚糖纳米纤维/ZnO纳米颗粒生物纳米复合膜, 用其包装的鲜牛肉在贮藏期间很好地保持了理化和颜色特性。一些应用纳米技术保护肉类品质的研究如表3所示。

表3 纳米技术在保护肉类品质中的应用

肉样	纳米结构材料	效果	参考文献
猪肉饼	纳米乳剂	纳米乳剂对猪肉饼的理化和感官特性具有积极作用, 并且可以起到酸化作用, 有助于老年人消化吸收	[70]
瑶肉	八角茴香精油、聚赖氨酸和乳酸链球菌素的混合物的纳米乳剂	20 d之内对水分含量没有影响, 保质期从8 d延长至16 d, 并且可以更好地保持颜色、气味和整体接受度	[71]
鸡蛋	聚乙烯醇、海藻酸钠和壳聚糖组成的双层纳米膜	在溶解性、阻水性和机械性能方面表现出更好的整体性能, 在室温贮藏15 d期间, 双层涂膜能有效维持带壳蛋的内部品质	[72]
猪肉	丁香微胶囊	较未处理组有较好的色泽、气味、弹性和黏度, 能保持较好的新鲜度	[73]
猪肉饼	丁香精油纳米胶囊	显著抑制猪肉饼脂质氧化和微生物生长, 并使猪肉饼具有较高的红色稳定性, 且对猪肉饼冷藏期间的感官指标没有不良影响	[47]
冷鲜猪肉	肉桂精油-羟丙甲基纤维素乳液涂膜	乳化技术包埋精油降低了其对感官品质的影响, 同时提高了保鲜作用, 较普通乳液、油-水分散液保鲜效果最好	[74]
酱牛肉	纳米包装	与普通包装酱牛肉相比, 采用纳米材料包装酱牛肉的感官指标下降较慢, 能够降低酱牛肉中挥发性盐基氮的产生量, 抑制细菌的生长繁殖, 延长酱牛肉的保质期	[75]
新鲜家禽碎肉	壳聚糖结合ZnO纳米粒子的生物纳米复合材料	当用作肉类的初级包装时, 用薄膜保护的样品脂肪降解速率降低, 表现为保留了肉类最初的红色, 氧化过程减缓, 微生物生长减少	[64]

3 结 语

目前纳米技术已广泛应用于计算机、合成新材料、化妆品等多个领域, 其在食品领域中的应用越来越受到科学家的重视。纳米保鲜技术在肉类保鲜中可以将活性或智能特性传递到食品包装中, 能够保护肉类免受外界因素的影响, 并通过抗菌性和/或对环境变化的响应来提高肉类的稳定性, 具有深远的发展空间。利用纳米技术开发绿色、可食、高效的保鲜材料, 不仅可以保护食物感官特性, 还能保证营养价值, 延长货架期。尽管纳米保鲜技术有很多优点, 但纳米技术在食品领域中的应用还不成熟。如何更好地控制缓释, 使其发挥理想作用并控制其向食品中迁移, 仍需要进一步研究。纳米保鲜技术对于肉类工业有重大意义, 但如何批量生产纳米保鲜剂是纳米保鲜技术产业化应用的关键问题之一。

纳米技术具有双面性, 与效应物结合可增强作用效果, 延长作用时间, 改变宏观特性, 但同时要注意其带来的负面作用。由于纳米颗粒具有某些独特的特性(如大小、形状、表面化学和电荷), 使其可以应用在生物医学中。但是这些特性被认为是纳米颗粒诱导生物毒性的基础。当纳米粒子直接或间接作用于人体时, 可能会



影响器官和组织的正常结构。目前对于纳米技术的研究只涉及应用方面,缺少纳米粒子对于人体健康方面的研究。尽管有生理实验证明一些纳米材料对小鼠无明显生理危害,但是对于人体的潜在风险和益处仍需研究。纳米技术虽然对肉类保鲜起到很大的作用,但目前需要与其他保鲜技术同时使用,才能使其保鲜效果最大化。今后应开发出更安全、便捷、高效的肉类保鲜方法,满足人们对肉品品质和安全的要求。

参考文献:

- [1] 中华人民共和国国家统计局. 中国统计年鉴[M]. 北京: 中国统计出版社, 2020.
- [2] 程述震, 王晓拓, 王志东. 冷鲜肉保鲜技术研究进展[J]. 食品研究与开发, 2017, 38(16): 194-198. DOI:10.3969/j.issn.1005-6521.2017.16.042.
- [3] RIBEIRO J S, SANTOS M J M C, SILVA L K R, et al. Natural antioxidants used in meat products: a brief review[J]. Meat Science, 2019, 148: 181-188. DOI:10.1016/j.meatsci.2018.10.016.
- [4] 李月明, 刘飞, 姜雪晶, 等. 生物可降解膜在肉品保鲜中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 51-54. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201706010.
- [5] MCMILLIN K W. Where is MAP going? A review and future potential of modified atmosphere packaging for meat[J]. Meat Science, 2008, 80(1): 43-65. DOI:10.1016/j.meatsci.2008.05.028.
- [6] ARVANITOYANNIS I S, STRATAKOS A C. Application of modified atmosphere packaging and active/smart technologies to red meat and poultry: a review[J]. Food and Bioprocess Technology, 2012, 5(5): 1423-1446. DOI:10.1007/s11947-012-0803-z.
- [7] OLMO A D, CALZADA J, NUÑEZ M. Effect of high pressure processing and modified atmosphere packaging on the safety and quality of sliced ready-to-eat "lacón", a cured-cooked pork meat product[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2014, 23: 25-32. DOI:10.1016/j.ifset.2014.03.003.
- [8] 乐攀. 纳米银复合保鲜剂对南丰蜜橘的保鲜研究[D]. 南昌: 南昌大学, 2014: 8-13.
- [9] OZIMEK L, POSPIECH E, NARINE S. Nanotechnologies in food and meat processing[J]. Acta Scientiarum Polonorum-Technologia Alimentaria, 2010, 9(4): 401-412.
- [10] DUNCAN T V. Applications of nanotechnology in food packaging and food safety: barrier materials, antimicrobials and sensors[J]. Journal of Colloid and Interface Science, 2011, 363(1): 1-24. DOI:10.1016/j.jcis.2011.07.017.
- [11] UNALAN I U, CERRI G, MARCUZZO E, et al. Nanocomposite films and coatings using inorganic nanobuilding blocks (NBB): current applications and future opportunities in the food packaging sector[J]. RSC Advances, 2014, 4(56): 29393-29428. DOI:10.1039/C4RA01778A.
- [12] SULLIVAN D J, AZLINHASIM S, CRUZROMERO M C, et al. Antimicrobial effect of benzoic and sorbic acid salts and nano-solubilises against *Staphylococcus aureus*, *Pseudomonas fluorescens* and chicken microbiota biofilms[J]. Food Control, 2020, 107: 106786. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106786.
- [13] YAO Xiaolin, XU Kai, WU Kao, et al. Iron encapsulated microstructured gel beads using emulsification-gelation technique for alginate-caseinate matrix[J]. Food and Function, 2020, 11(5): 3811-3822. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106786.
- [14] ALIZADEH-SANI M, MOHAMMADIAN E, MCCLEMENTS D J. Eco-friendly active packaging consisting of nanostructured biopolymer matrix reinforced with TiO₂ and essential oil: application for preservation of refrigerated meat[J]. Food Chemistry, 2020, 322: 126782. DOI:10.1016/j.foodchem.2020.126782.
- [15] XU Yixiang, REHMANI N, ALSUBAIE L, et al. Tapioca starch active nanocomposite films and their antimicrobial effectiveness on ready-to-eat chicken meat[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2018, 16: 86-91. DOI:10.1016/j.fpsl.2018.02.006.
- [16] 商明慧, 陈强, 陈春英. 包装材料及食品中纳米材料的检测与表征技术[J]. 生态毒理学报, 2013, 8(6): 824-838. DOI:10.7524/AJE.1673-5897.20121117001.
- [17] PALIT S. Recent advances in the application of nanotechnology in food industry and the vast vision for the future[J]. Nanoengineering in the Beverage Industry, 2020, 20: 1-34. DOI:10.1016/B978-0-12-816677-2.00001-6.
- [18] RAO J J, MCCLEMENTS D J. Food-grade microemulsions, nanoemulsions and emulsions: fabrication from sucrose monopalmitate and lemon oil[J]. Food Hydrocolloids, 2011, 25(6): 1413-1423. DOI:10.1016/j.foodhyd.2011.02.004.
- [19] ABOALNAJA K O, YAGHMOOR S, KUMOSANI T A, et al. Utilization of nanoemulsions to enhance bioactivity of pharmaceuticals, supplements, and nutraceuticals: nanoemulsion delivery systems and nanoemulsion excipient systems[J]. Expert Opinion on Drug Delivery, 2016, 13(9): 1327-1336. DOI:10.1517/17425247.2016.1162154.
- [20] ACOSTA E. Bioavailability of nanoparticles in nutrient and nutraceutical delivery[J]. Current Opinion in Colloid and Interface Science, 2009, 14(1): 3-15. DOI:10.1016/j.cocis.2008.01.002.
- [21] NUNES S, MADUREIRA A R, CAMPOS D A, et al. Solid lipid nanoparticles as oral delivery systems of phenolic compounds: overcoming pharmacokinetic limitations for nutraceutical applications[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 57(9): 1863-1873. DOI:10.1080/10408398.2015.1031337.
- [22] ROGERS M A. Naturally occurring nanoparticles in food[J]. Current Opinion in Food Science, 2016, 7: 14-19. DOI:10.1016/j.cofs.2015.08.005.
- [23] YAO Mingfei, XIAO Hang, MCCLEMENTS D J. Delivery of lipophilic bioactives: assembly, disassembly, and reassembly of lipid nanoparticles[J]. Annual Review of Food Science and Technology, 2014, 5(1): 53-81. DOI:10.1146/annurev-food-072913-100350.
- [24] MARTÍNEZ-HERNÁNDEZ G B, AMODIO M L, COLELLI G, et al. Carvacrol-loaded chitosan nanoparticles maintain quality of fresh-cut carrots[J]. Innovative Food Science and Emerging Technologies, 2017, 41: 56-63. DOI:10.1016/j.ifset.2017.02.005.
- [25] SEETHA M, BHARATHI S, RAJ A D, et al. Optical investigations on indium oxide nano-particles prepared through precipitation method[J]. Materials Characterization, 2009, 60(12): 1578-1582. DOI:10.1016/j.matchar.2009.09.009.
- [26] XIANG Siying, YANG Peng, GUO Hao, et al. Green tea makes polyphenol nanoparticles with radical-scavenging activities[J]. Macromolecular Rapid Communications, 2017, 38(23): 1700446. DOI:10.1002/marc.201700446.
- [27] LIN Lin, GU Yulei, CUI Haiying. Moringa oil/chitosan nanoparticles embedded gelatin nanofibers for food packaging against *Listeria monocytogenes* and *Staphylococcus aureus* on cheese[J]. Food Packaging and Shelf Life, 2019, 19: 86-93. DOI:10.1016/j.fpsl.2018.12.005.
- [28] YADAV S, MEHROTRA G K, BHARTIYA P, et al. Preparation, physicochemical and biological evaluation of quercetin based chitosan-

- gelatin film for food packaging[J]. Carbohydrate Polymers, 2020, 227: 115348. DOI:10.1016/j.carbpol.2019.115348.
- [29] JAFARI S M, KHANZADI M, MIRZAEI H, et al. Hydrophobicity, thermal and micro-structural properties of whey protein concentrate-pullulan-beeswax films[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2015, 80: 506-511. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2015.07.017.
- [30] KHANZADI M, JAFARI S M, MIRZAEI H, et al. Physical and mechanical properties in biodegradable films of whey protein concentrate-pullulan by application of beeswax[J]. Carbohydrate Polymers, 2015, 118: 24-29. DOI:10.1016/j.carbpol.2014.11.015.
- [31] RHIM J W, WANG L F, HONG S I. Preparation and characterization of agar/silver nanoparticles composite films with antimicrobial activity[J]. Food Hydrocolloids, 2013, 33(2): 327-335. DOI:10.1016/j.foodhyd.2013.04.002.
- [32] DEHNAD D, MIRZAEI H, EMAMDJOMEH Z, et al. Thermal and antimicrobial properties of chitosan-nanocellulose films for extending shelf life of ground meat[J]. Carbohydrate Polymers, 2014, 109: 148-154. DOI:10.1016/j.carbpol.2014.03.063.
- [33] TABATABAEI R H, JAFARI S M, MIRZAEI H, et al. Preparation and characterization of nano-SiO₂ reinforced gelatin-κ-carrageenan biocomposites[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2018, 111: 1091-1099. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2018.01.116.
- [34] WU Zhengguo, ZHOU Wei, PANG Chunsheng, et al. Multifunctional chitosan-based coating with liposomes containing laurel essential oils and nanosilver for pork preservation[J]. Food Chemistry, 2019, 295: 16-25. DOI:10.1016/j.foodchem.2019.05.114.
- [35] 贺旺林, 俞龙浩. 基于腐败微生物的低温肉制品货架期预测研究进展[J]. 黑龙江八一农垦大学学报, 2015, 27(2): 51-56. DOI:10.3969/j.issn.1002-2090.2015.02.012.
- [36] RODINO S, BUTU A, PETRACHE P, et al. Evaluation of the antimicrobial and antioxidant activity of sambucus ebulus extract[J]. Farmacia, 2015, 63(5): 751-754.
- [37] JU Jian, XIE Yunfei, GUO Yahui, et al. The inhibitory effect of plant essential oils on foodborne pathogenic bacteria in food[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2019, 59(20): 3281-3292. DOI:10.1080/10408398.2018.1488159.
- [38] AHMADI M, MADRAKIAN T, GHAVAMI S. Preparation and characterization of simvastatin nanocapsules: encapsulation of hydrophobic drugs in calcium alginate[J]. Methods in Molecular Biology, 2020, 2125: 47-56. DOI:10.1007/978-1-4939-9894-18/41/R01.
- [39] MASON T G, WILKING J N, MELESON K, et al. Nanoemulsions: formation, structure, and physical properties[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 2006, 18(41): 635-666. DOI:10.1088/0953-8984/18/41/R01.
- [40] UNTARI B, WIJAYA D P, MARDIYANTO M, et al. Physical interaction of chitosan-alginate entrapping extract of papaya leaf and formation of submicron particles dosage form[J]. Science and Technology Indonesia, 2019, 4(3): 64-69. DOI:10.26554/sti.2019.4.3.64-69.
- [41] JIANG Jiang, XIONG Youling L. Technologies and mechanisms for safety control of ready-to-eat muscle foods: an updated review[J]. Critical Reviews in Food Science and Nutrition, 2015, 55(13): 1886-1901. DOI:10.1080/10408398.2012.732624.
- [42] TRZASKA W J, CORREIA J N, VILLEGAS M T, et al. pH manipulation as a novel strategy for treating mucormycosis[J]. Antimicrobial Agents and Chemotherapy, 2015, 59(11): 6968-6974. DOI:10.1128/AAC.01366-15.
- [43] 张志刚, 林祥木, 胡涛, 等. 即食肉制品微生物污染及其控制技术研究进展[J]. 肉类研究, 2020, 34(1): 94-102. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-20191107-269.
- [44] CUI Haiying, BAI Mei, LI Changzhu, et al. Fabrication of chitosan nanofibers containing tea tree oil liposomes against *Salmonella* spp. in chicken[J]. LWT-Food Science and Technology, 2018, 96: 671-678. DOI:10.1016/j.lwt.2018.06.026.
- [45] ZHANG Le, LIU Anjun, WANG Wenhong, et al. Characterisation of microemulsion nanofilms based on Tilapia fish skin gelatine and ZnO nanoparticles incorporated with ginger essential oil: meat packaging application[J]. International Journal of Food Science and Technology, 2017, 52(7): 1670-1679. DOI:10.1111/ijfs.13441.
- [46] NALÇABASMAZ S, AYHAN Z, CIMMINO S, et al. Effects of PP-based nanopackaging on the overall quality and shelf life of ready-to-eat salami[J]. Packaging Technology and Science, 2017, 30(10): 663-679. DOI:10.1002/pts.2309.
- [47] 张慧芸, 何鹏, 李鑫玲, 等. 丁香精油纳米胶囊对冷藏调理猪肉饼品质的影响[J]. 食品科学, 2019, 40(3): 259-265. DOI:10.7506/spkx1002-6630-20171113-138.
- [48] 梁艳文, 严文静, 赵见营, 等. 纳米Ag@SiO₂改性聚偏二氯乙烯涂膜材料及提高清洁鸡蛋贮藏保鲜效果[J]. 食品科学, 2018, 39(23): 235-242. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201823035.
- [49] 张力. 自组合法制备丁香酚纳米微粒及其在冷鲜肉保鲜中的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2017: 44-59.
- [50] MARCOUS A, RASOULI S, ARDESTANI F. Inhibition of *Staphylococcus aureus* growth in fresh calf minced meat using low density polyethylene films package promoted by titanium dioxide and zinc oxide nanoparticles[J]. Journal of Particle Science and Technology, 2017, 3(1): 1-11. DOI:10.22104/JPST.2017.451.
- [51] SANI M A, EHSANI A, HASHEMI M. Whey protein isolate/cellulose nanofibre/TiO₂ nanoparticle/rosemary essential oil nanocomposite film: its effect on microbial and sensory quality of lamb meat and growth of common foodborne pathogenic bacteria during refrigeration[J]. International Journal of Food Microbiology, 2017, 251: 8-14. DOI:10.1016/j.ijfoodmicro.2017.03.018.
- [52] RAHMAN P M, MUJEEB V M A, MURALEEDHARAN K. Flexible chitosan-nano ZnO antimicrobial pouches as a new material for extending the shelf life of raw meat[J]. International Journal of Biological Macromolecules, 2017, 97: 382-391. DOI:10.1016/j.ijbiomac.2017.01.052.
- [53] KHAN M R, SADIQ M B, MEHMOOD Z. Development of edible gelatin composite films enriched with polyphenol loaded nanoemulsions as chicken meat packaging material[J]. CyTA-Journal of Food, 2020, 18(1): 137-146. DOI:10.1080/19476337.2020.1720826.
- [54] WANG Yifei, ZHANG Qian, BIAN Wenyi, et al. Preservation of traditional Chinese pork balls supplemented with essential oil microemulsion in a phase-change material package[J]. Journal of the Science of Food and Agriculture, 2020, 100(5): 2288-2295. DOI:10.1002/jsfa.10262.
- [55] 柯海瑞, 康怀彬, 蔡超奇. 脂肪氧化对肉品风味影响的研究进展[J]. 农产品加工, 2020(6): 58-62; 71. DOI:10.16693/j.cnki.1671-9646(X).2020.03.050.
- [56] 王正勇, 盛益东. 肉制品中的脂肪氧化[J]. 江苏食品与发酵, 1999(1): 16-19.
- [57] MEYNIER A, GENOT C, GANDEMERE G. Volatile compounds of oxidized pork phospholipids[J]. Journal of the American Oil Chemists Society, 1998, 75(1): 1-7.
- [58] 刘立群, 喻倩倩, 刘毅, 等. 天然抗氧化剂作用机理及在肉类制品中的应用研究进展[J]. 肉类研究, 2017, 31(6): 45-50. DOI:10.7506/rlyj1001-8123-201706009.



- [59] 楼鼎鼎, 戚炯炯, 张英, 等. 竹叶抗氧化物在双汇西式肉制品中的应用研究[J]. 中国食品学报, 2006, 6(3): 111-114. DOI:10.16429/j.1009-7848.2006.03.021.
- [60] 章林, 黄明, 周光宏. 天然抗氧化剂在肉制品中的应用研究进展[J]. 食品科学, 2012, 33(7): 299-303.
- [61] 武陶. 山梨酸纳米粒的制备及其在肉品保鲜上的应用[D]. 杨凌: 西北农林科技大学, 2014: 43-49.
- [62] PANE A B, RIPOLL G, GONZÁLEZ J, et al. Effect of nanocomposite packaging containing different proportions of ZnO and Ag on chicken breast meat quality[J]. Journal of Food Engineering, 2014, 123: 104-112. DOI:10.1016/j.jfoodeng.2013.09.029.
- [63] 王佳奕, 王婧, 丁武. 山梨酸纳米微粒在冷却猪肉保鲜中的应用[J]. 食品科学, 2018, 39(9): 202-206. DOI:10.7506/spkx1002-6630-201809031.
- [64] SOUZA V G L, RODRIGUES C, VALENTE S, et al. Eco-friendly ZnO/chitosan bionanocomposites films for packaging of fresh poultry meat[J]. Coatings, 2020, 10(2): 110. DOI:10.3390/coatings10020110.
- [65] PABAST M, SHARIATIFAR N, BEIKZADEH S, et al. Effects of chitosan coatings incorporating with free or nano-encapsulated *Satureja* plant essential oil on quality characteristics of lamb meat[J]. Food Control, 2018, 91: 185-192. DOI:10.1016/j.foodcont.2018.03.047.
- [66] FLETCHER D L. Poultry meat quality[J]. World's Poultry Science Journal, 2002, 58(2): 131-145. DOI:10.1079/WPS20020013.
- [67] 谢菁. 冷鲜猪肉复合保鲜包装技术的研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 8-26.
- [68] ZHANG Huiyun, LIANG Ying, LI Xinling, et al. Effect of chitosan-gelatin coating containing nano-encapsulated tarragon essential oil on the preservation of pork slices[J]. Meat Science, 2020, 167. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108137.
- [69] AMJADI S, NAZARI M, ALIZADEH S A, et al. Multifunctional betanin nanoliposomes-incorporated gelatin/chitosan nanofiber/ZnO nanoparticles nanocomposite film for fresh beef preservation[J]. Meat Science, 2020, 167: 108161. DOI:10.1016/j.meatsci.2020.108161.
- [70] LEE J, KIM H, CHOI M J, et al. Improved physicochemical properties of pork patty supplemented with oil-in-water nanoemulsion[J]. Food Science of Animal Resources, 2020, 40(2): 262-273. DOI:10.5851/kosfa.2020.e11.
- [71] LIU Qiong, ZHANG Min, BHANDARI B, et al. Effects of nanoemulsion-based active coatings with composite mixture of star anise essential oil, polylysine, and nisin on the quality and shelf life of ready-to-eat Yao meat products[J]. Food Control, 2020, 107: 106771. DOI:10.1016/j.foodcont.2019.106771.
- [72] ZHUANG Chenjun, JIANG Yongli, ZHONG Yu, et al. Development and characterization of nano-bilayer films composed of polyvinyl alcohol, chitosan and alginate[J]. Food Control, 2018, 86: 191-199. DOI:10.1016/j.foodcont.2017.11.024.
- [73] 孙艳文, 邵京, 马蕊, 等. 丁香精油微胶囊工艺优化及其对冰温猪肉保鲜效果的影响[J]. 食品工业科技, 2018, 39(19): 134-141. DOI:10.13386/j.issn1002-0306.2018.19.024.
- [74] 王雅南, 王稳航. 肉桂精油-羟丙甲基纤维素乳液涂层对冷鲜肉保鲜效果的影响[J]. 中国食品添加剂, 2018(4): 164-170.
- [75] 李红梅. 食品纳米包装材料的制备及对食品保鲜作用的研究[D]. 南京: 南京农业大学, 2008: 59-64.